

## **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Juárez, C.<sup>1</sup>; Güereca, L.<sup>1</sup>; Gassó, S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Calidad Ambiental, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Estado de México (ITESM-CEM). Carretera Lago de Guadalupe Km 3.5 Atizapán de Zaragoza 58926 Estado de México, México.

<sup>2</sup> Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Colom 11, 08222 Terrassa, Barcelona España.

### **Resumen**

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que determina los potenciales impactos ambientales asociados con un producto o servicio, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final. El objetivo de este estudio es evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a cada uno de los procesos del sistema de gestión de residuos sólidos de la Ciudad de México, mediante la aplicación del software TEAM, se evaluó las siguientes categorías de impacto: acidificación, disminución del ozono estratosférico, eutrofización, efecto invernadero (directo, 100 años), formación de foto-oxidantes, toxicidad terrestre, efectos carcinogénicos y efectos respiratorios. Los resultados sugieren que el sistema de manejo de residuos sólidos de la Ciudad de México presenta impactos relevantes en los procesos de vertedero controlado, vertederos no controlados y reciclado de vidrio; el proceso de fabricación de compost se presenta como una opción favorable debido a que no presenta impactos ambientales significativos. El ACV realizado sugiere la siguiente jerarquía de tratamientos de residuos municipales: fabricación de compost, incineración, reciclaje y vertedero controlado. La peor alternativa es el vertido no controlado de residuos debido a que se trata de superficies donde los residuos son depositados de forma clandestina y no cuentan con ningún tipo de control de la contaminación.

*Palabras claves: Análisis del ciclo de vida, gestión de residuos sólidos, vertederos no controlados, composta, vertedero, incineración.*

### **1. Introducción**

La búsqueda del desarrollo sostenible demanda la reducción en la producción de residuos municipales, así como la generación de nuevas estrategias de gestión que minimicen los impactos ambientales. Debido a ello, es necesario evaluar, de una manera objetiva, las implicaciones ambientales derivadas de los sistemas de gestión de residuos municipales [1].

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta objetiva y sistemática que ha sido aplicada para evaluar los impactos ambientales de los sistemas de gestión de residuos municipales ([2], [3], [4], [5], [6], [7] [8], [9], [10] y [11], entre otros).

Los ACV estudian los aspectos ambientales y los potenciales impactos a través del ciclo de vida de un producto o servicio, desde la extracción de la materia prima, la producción, el uso y la disposición final.

En este trabajo se desarrolla un ACV para evaluar las implicaciones ambientales de cinco escenarios de gestión de residuos desarrollados para la Ciudad de México (también denominada Distrito Federal).

Hasta el año 2004 no existía un plan de gestión integral de los residuos para la Ciudad de México y éstos se recolectaban y se enviaban directamente al vertedero controlado [12]; sin embargo en 2002 se publica la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal que da origen al Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Distrito Federal [13], donde se establecen una serie de medidas cuyo objetivo es reducir la disposición de residuos sólidos en vertedero.

El objetivo de este trabajo es evaluar los potenciales impactos ambientales asociados al Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) de la ciudad de México, tomando como base el sistema actual y comparándolo con cuatro escenarios de gestión de residuos propuestos para identificar el sistema mas eficiente en términos ambientales.

## **2. Metodología**

### **2.1. Límites del Sistema**

*Límite espacial.*- Este trabajo se limita a la Ciudad de México (Distrito Federal) con una superficie de 1,485 Km<sup>2</sup>, con una población de 8,720,916 habitantes [14] y presenta una tasa de generación de residuos municipales de 1.63 kg/hab/día.

*Límite temporal.*- Se considera como escenario base la gestión actual de los residuos sólidos que se sustenta en el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2006 [12] y en el Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal 2007 [15]; que constituyen el compendio de información técnica y estadística que ha recopilado la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal y la Dirección General de Servicios Urbanos respectivamente, basándose en estudios desarrollados en las diversas etapas del manejo.

*Límite por tipo de residuos.*- En este estudio se consideran los denominados Residuos Sólidos que son residuos procedentes de los domicilios, comercios y oficinas. Los residuos de manejo especial no se han considerado porque, dado que representan un peligro potencial para la salud humana y el medio ambiente, son recolectados en su totalidad de forma selectiva de forma independiente y/o particular.

### **2.2 Unidad Funcional**

La unidad funcional de este ACV es la cantidad de residuos sólidos generados en el año 2007 en el Distrito Federal, lo que equivale a 5197733 toneladas.

### **2.3 Descripción del sistema de gestión de residuos sólidos**

Los procesos que forman parte del sistema de manejo de residuos sólidos y las cantidades manejadas durante dichos proceso se describen en la Tabla 1 y en la Figura 1 se detallan los flujos de entradas de materias y las salidas de materias y emisiones.

### *2.3.1 Recolección*

Las 16 delegaciones de la ciudad de México tienen a su cargo la recolección y transporte de los residuos sólidos urbanos a las estaciones de transferencia (TRA). Para realizar esta labor, se cuentan con un parque vehicular de 2,163 unidades, de los cuales 73 unidades cuentan con caja separada para la recolección simultánea de residuos orgánicos e inorgánicos. En el sistema de gestión actual sólo el 4% de los residuos son recolectados de forma selectiva (RS), mientras que el 83% son recuperados mediante la recogida general ó recogida no selectiva (RNS). Se ha estimado que el resto de los residuos son trasladados a vertederos no controlados (tiraderos clandestinos).

### *2.3.2 Tiraderos Clandestinos (TC)*

Del total de los residuos sólidos que se genera en el Distrito Federal sólo el 86% es recogida y trasladada al vertedero controlado. El resto se arroja en calles, barrancas y lotes baldíos, a los que se les denomina tiraderos clandestinos (vertederos no controlados) [16]. En estos lugares se encuentran una amplia gama de residuos mezclados.

### *2.3.3 Transferencia (TRA)*

La transferencia tiene como finalidad el trasvase de residuos desde los camiones recolectores, de menor capacidad, a camiones de gran capacidad que transportaran los residuos al vertedero. Existen trece plantas de Transferencia de residuos, en las que se reciben los residuos mezclados de la recogida general y la recogida selectiva, de aquí los residuos se transportan hacia las plantas de composta, plantas de selección y vertedero.

### *2.3.4 Plantas de selección (PSE)*

Aunque la primera clasificación de residuos ocurre (o debería ocurrir) en casa; la separación de los residuos constituye un elemento dentro del manejo integrado de residuos ya que es necesario un procesamiento o separación adicional antes de poder reutilizar estos materiales. La Ciudad de México cuenta con tres plantas de selección de residuos sólidos, en las que se recuperan materiales reciclables

### *2.3.5 Reciclaje*

Los materiales que se reciclan en el Distrito Federal a partir de la clasificación realizada en las plantas de selección son: aluminio, papel y cartón, ferricos (chatarra, lámina, fierro, cobre), vidrio, plásticos y madera.

### *2.3.5 Plantas de fabricación de compost*

La Ciudad de México cuenta con una planta de fabricación de compost, en donde se procesan los residuos fermentables para su aprovechamiento.

### *2.3.6 Vertedero*

La Ciudad cuenta con un vertedero controlado llamado "Relleno Sanitario de Bordo Poniente-Etapa IV", con 472 hectáreas de superficie y un área de disposición de 320 hectáreas.

Tabla 1. Procesos que forman parte del sistema de manejo de Residuos Sólidos del DF.

Abreviatura	Proceso	Descripción	Cantidad de residuos (t)
	Generación total		5197733
RNS	Recogida no selectiva	Recogida domiciliaria que no esta separada	4304969
PP	Pepena	Selección realizada por personas, venta individual	183595
RS	Recogida selectiva	Recogida domiciliaria que esta separada (orgánicos-inorgánicos)	207891
TC	Tiraderos clandestinos	Destino ilegales de Residuos Sólidos	684873
TRA	Estaciones de transferencia	Paso intermedio entre la generación y el destino final de los Residuos Sólidos	4013175
COM	Planta de fabricación de compost,	Lugar donde los residuos orgánicos que se usan en la elaboración de composta	24000
PSE	Plantas de selección	Lugar en donde son separados los materiales que irán a reciclaje	1563660
RR	Reciclaje		98185
Rpyc	Papel y cartón 43%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	41945
Rp	Plásticos 34%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	34146
Rf	Férricos 9%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	9208
Ra.	Aluminio 5%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	567
Rv	Vidrio 12%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	12087
Rma	Madera 2%	Cantidad de aluminio revalorizado para reciclaje	232
VER	Relleno bordo poniente	Destino final de los residuos que no pudieron ser revalorizados	4207080

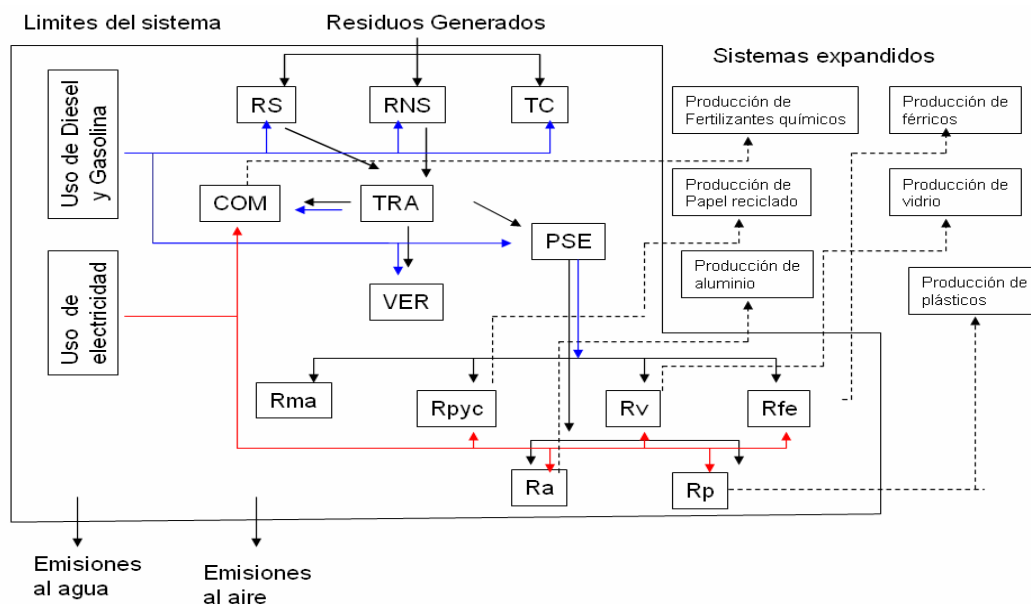


Figura 1. Procesos incluidos en el sistema actual

## 2.4 Inventario del Ciclo de Vida

La generación del inventario está basada en la información publicada en el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2006 [12] y en el Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal 2007 [15].

Los escenarios de gestión de residuos analizados son los siguientes: el escenario **E1** es el sistema actual de gestión de residuos, considerando la unidad funcional se construyen otros cuatro escenarios. Los escenarios **E2** y **E3** se realiza conforme a las líneas de acciones estratégicas que se integran en el PGIRS-DF 2004-2008 [13], cuyas metas son: 1) aumentar la recogida selectiva para generar mayor composta y 2) incrementar el porcentaje de recuperación de residuos en las plantas de selección, es decir fomentar el reciclaje de materiales. El escenario **E4** corresponde a las metas de recolección de residuos, fabricación de compost e incineración presentadas en el Plan Federal de Gestión de Residuos de Austria [17] sin incluir biogasificación; y el escenario **E5** esta basado en las características del sistema de gestión actual pero incluyendo un proceso de incineración.

El requerimiento energético por transporte (uso de diesel y gasolina para la RS, RNS, y TC, y traslado de TRA a PSE, de TRA a COM, de TRA a VER), se estimó a partir de la distancia y el consumo promedio por tonelada transportada (rendimiento) de los camiones utilizados para dicho fin.

Los factores de emisión en de los tiraderos clandestinos y vertedero controlado fueron calculados de acuerdo a los datos reportados por McDougall *et al.*, [10] y Güereca [16]. En el uso de electricidad, los datos son representativos de la producción media de Estados Unidos en el año 2000. En el proceso de fabricación de compost se adopta el enfoque compensatorio en el cual se asume que el compost sustituye el uso de fertilizante inorgánico (Finnveden, 1999).

Los requerimientos energéticos de los procesos fueron estimados de acuerdo a McDougall *et al.*, [10]; para en el proceso de fabricación de compost de 30kWh/t de residuos fermentables, en las plantas de selección por 27 kWh/t en bandas transportadoras y 0.87 l/t de diesel para las palas mecánicas; y en cuanto a la electricidad requerida para el reciclaje los datos fueron estimados de acuerdo a los reportado por BUWAL, 1998. [10]

Se considera una tasa de generación de biogás de 250m<sup>3</sup>/t con una eficiencia de recolección del 40% [10], el cual es tratado por medio de antorchas y el 60% restante se fuga, en cuanto a los una producción de lixiviados de 150 l/t depositada [10], de los cuales 30% se fugan y el 70% se logran recolectar para su depuración [18], la cual se asume que se lleva a cabo mediante la tecnología Biomembrat que requiere 2 kWh/m<sup>3</sup> de lixiviados [17].

En cuanto a las emisiones al agua y al aire por la producción de reciclaje de vidrio, cartón y papel, aluminio, plásticos y residuos ferricos fueron asignadas como emisiones evitadas debido al reciclaje de dichos productos, de acuerdo a la base de datos DEAM (Ecobilan).

## **2.5 Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida**

Las emisiones al aire y al agua fueron estimadas para cada proceso del sistema analizado, con ayuda del software TEAM 4.0 (Ecobilan), se obtuvo la evaluación de los impactos del ciclo de vida. Las categorías de impacto evaluadas son acidificación, disminución del ozono estratosférico, eutrofización, efecto invernadero a 100 años, formación de foto-oxidantes toxicidad humana, efectos carcinogénicos y efectos respiratorios.

### *2.5.1 Software utilizado*

Para la realización de la EICV se utilizó el software: "Tools for Environmental Analysis and Management" -TEAM<sub>TM</sub> versión 4.0 de Ecobilan y su base de datos asociada: "Data for Environmental Analysis and Management" - DEAM<sub>TM</sub>. TEAM permite describir el sistema e introducir los datos del inventario, pero también permite el cálculo del inventario a partir de los procesos industriales que se incluyen en la base de datos TEAM. Los procesos industriales que se consideran a partir de DEAM son los siguientes:

- Producción de energía eléctrica de acuerdo al perfil energético de Estados Unidos.
- Uso de combustibles de Diesel (used as fuel).
- Uso de combustibles de Gasolina (road transport).
- Uso de gas natural (para la incineración).
- Producción de fertilizante Superfosfato-normal, (para compensar impactos por producción de compost).
- Producción de planchas de aluminio (para compensar impactos por reciclaje de aluminio).
- Producción de acero (para compensar impactos por reciclaje de materiales férricos).
- Producción de papel sin blanqueador (para compensar impactos por reciclaje de papel y cartón).
- Producción de Polietileno de Alta Densidad (para compensar impactos por reciclaje de PEAD).
- Producción de Polietileno de Baja Densidad (para compensar impactos por reciclaje de PEBD).
- Producción de vidrio café (para compensar impactos por reciclaje de vidrio).

## **3. Resultados**

En la Figura 2a se observa que los escenarios propuestos mitigan el impacto en la categoría de acidificación. E4 es la alternativa que presenta un ahorro mayor con -5573.86.11 gramos de H<sup>+</sup>, en cambio el escenario E1 presenta un impacto con 6.33 gramos de H<sup>+</sup> equivalente. El proceso que destaca en los cinco escenarios para evitar la acidificación es la fabricación de compost. En E5 el proceso que destaca es INC, aquí la acidificación evitada obedece a los ahorros de emisiones de óxidos de azufre generados por la generación energía eléctrica.

En la Figura 3a se observa que los cinco escenarios contribuyen al deterioro de la capa de ozono. Los procesos de VER y TC son los más relevantes en esta categoría, sus impactos se relacionan por las emisiones de CFC 11, CFC 12, Halón, HCFC 123, HCFC 22 y tricloroetano, como se aprecia en la Figura 3b. Esto puede ser porque en los TC el 100% del biogás producido no es recolectado, y en el vertedero controlado se sigue generando emisiones de CFCs debido a que sólo se recolecta una parte del biogás que se genera. El daño evitado está definido por COM, y Rpyc, lo cual es más evidente en E4, ya que es un proceso en el que se ahorran materias primas, lo que propicia la mitigación de emisiones que deterioran la capa de ozono.

La Figura 4a muestra que todos los escenarios ahorran impactos por eutrofización aunque en diferente magnitud. El escenario E4 es la alternativa en la que los daños evitados son mayores con -3153.44 gramos de  $\text{PO}_4$  equivalente, y la E5 es la alternativa que menos mitigación genera con -63.13 gramos de  $\text{PO}_4$  equivalente. Los procesos que contribuyen principalmente a esta categoría son: TC y VER, y con una proporción menor Rp, RNS, PSE e INC. En esta categoría COM y Rpyc son dos procesos relevantes en el ahorro de emisiones para los cinco escenarios.

La Figura 5a muestra que los cinco escenarios contribuyen a la categoría de efecto invernadero. Las alternativas E3 y E1 presentan contribuciones mayores con emisiones de  $1.09\text{E}+06$  y  $1.07\text{E}+06$  kg equivalentes de  $\text{CO}_2$  equivalente respectivamente, y la Figura 5b, indica que los principales contribuyentes al efecto invernadero son TC, VER e INC, ya que involucran el uso de combustibles en el transporte. Los procesos de COM y Ra evitan el efecto invernadero, sin embargo, la proporción de ahorro frente a los procesos que la generan en cada escenario es mínima.

En la Figura 6a se observa que todos los escenarios contribuyen a la formación de foto-oxidantes. La contribución más importante la genera E3 con un valor de 335 kg equivalentes de etileno y la mínima la presenta el escenario E5 con 222 kg equivalentes de etileno. La Figura 6b se aprecia que los procesos de TC y VER generan las aportaciones más importantes para la formación de foto-oxidantes, y los ahorros en esta categoría se presentan en los escenarios E4 y E5 por el proceso de INC que evita el impacto por los beneficios por la generación de energía eléctrica superan las emisiones generadas.

La Figura 7a, muestra que tres escenarios evitan el impacto en la categoría de toxicidad terrestre, principalmente el escenario E4 con un ahorro de emisiones de -2149.53 gramos equivalentes de 1,4-DCB. En cambio los escenarios E1 y E5 presentan contribuciones al impacto con 37.62 y 117.93 gramos equivalentes de 1,4-DCB respectivamente.

En la Figura 7b indica que los procesos que ayudan a evitar este impacto son COM y Rp, porque el reciclaje reduce la ecotoxicidad, debido a que se evita la producción de materiales vírgenes y con ello la emisión de contaminantes [19]. Se observa que VER e INC son los principales procesos generadores de impacto por sus emisiones de arsénico, mercurio, zinc y dioxinas. Lo cual coincide con Güereca [17].



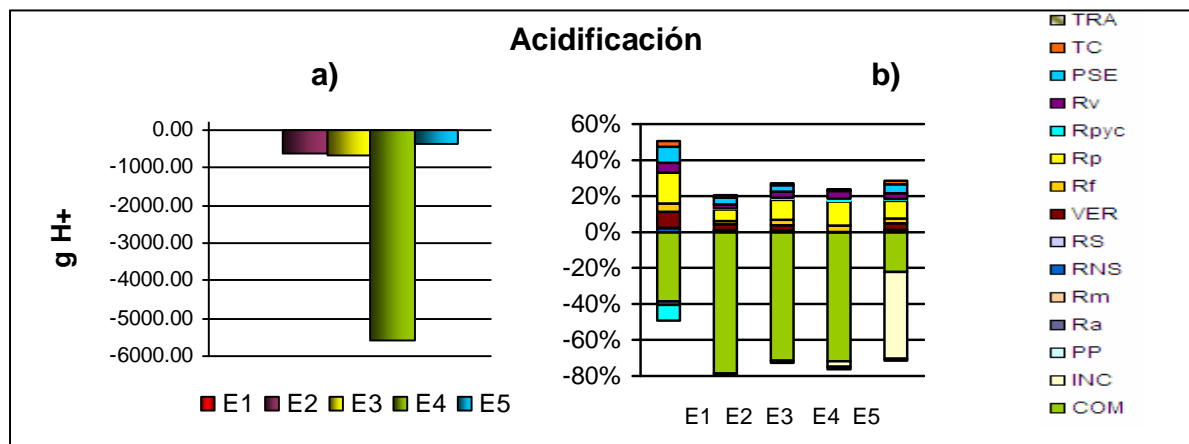


Figura 2. Contribuciones a la categoría de acidificación, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario

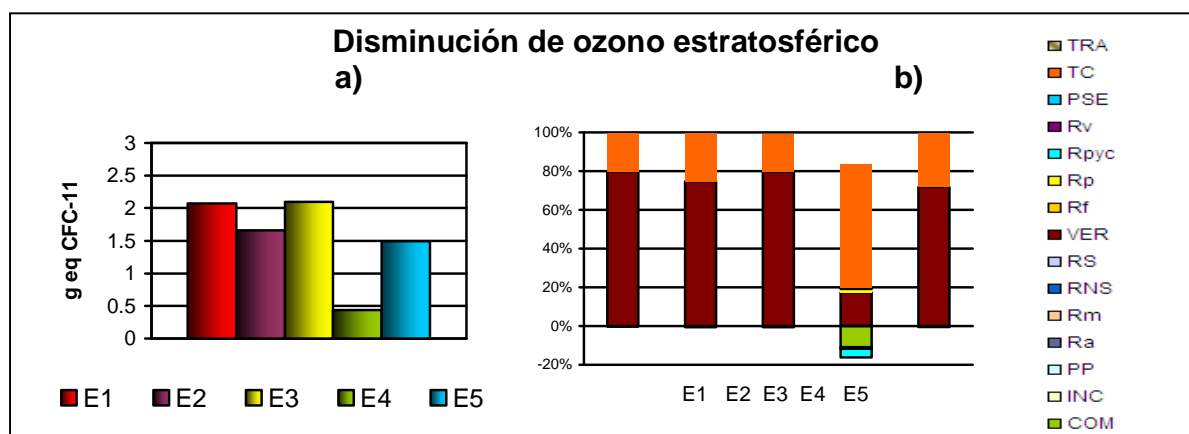


Figura 3 Contribuciones a la categoría de disminución del ozono estratosférico, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.

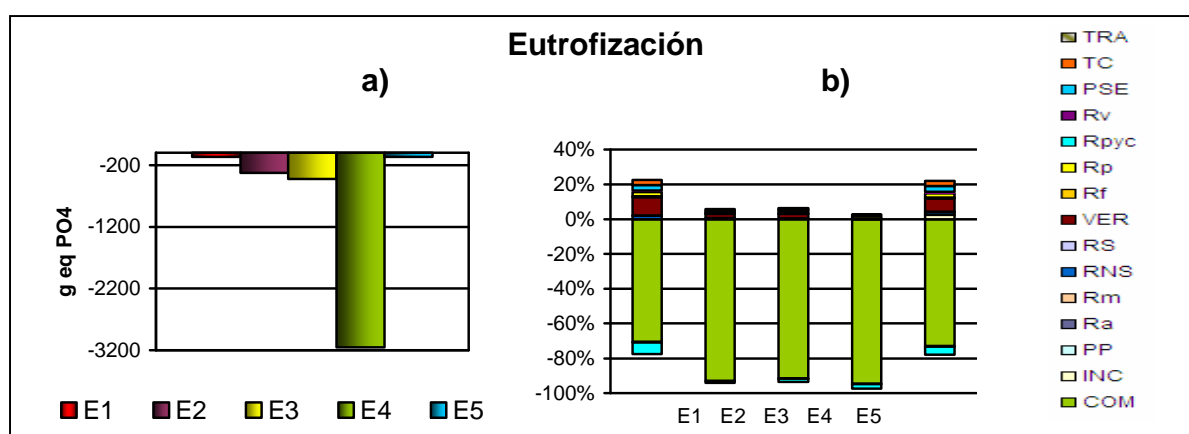


Figura 4. Contribuciones a la categoría de eutrofización, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.



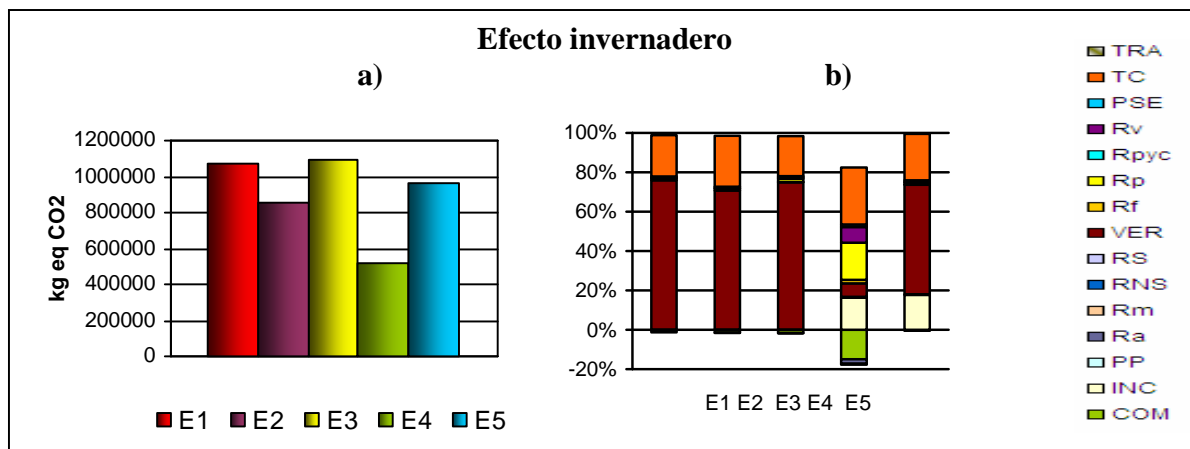


Figura 5. Contribuciones a la categoría de cambio climático, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.

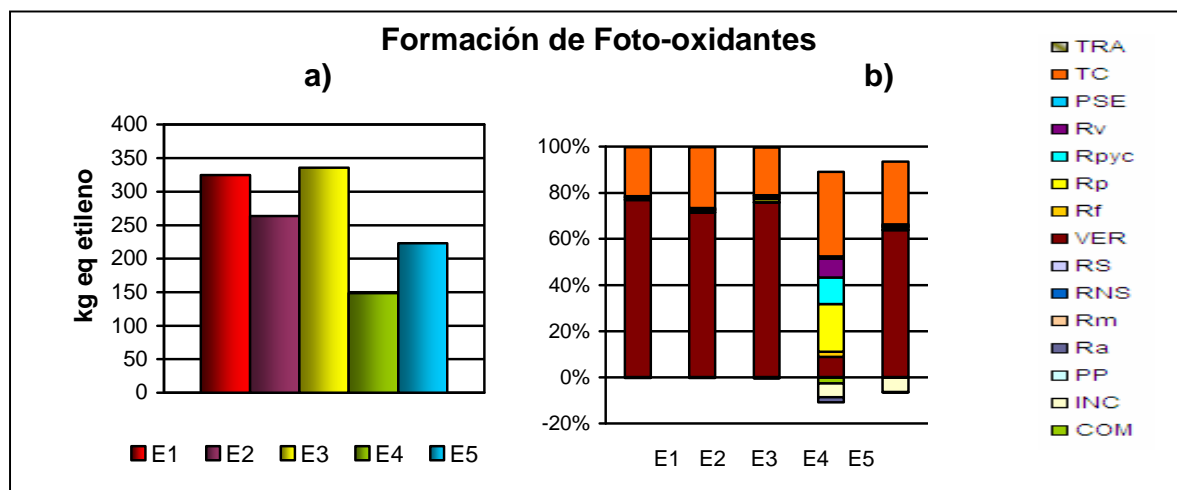


Figura 6. Contribuciones a la categoría de formación de foto-oxidantes, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario

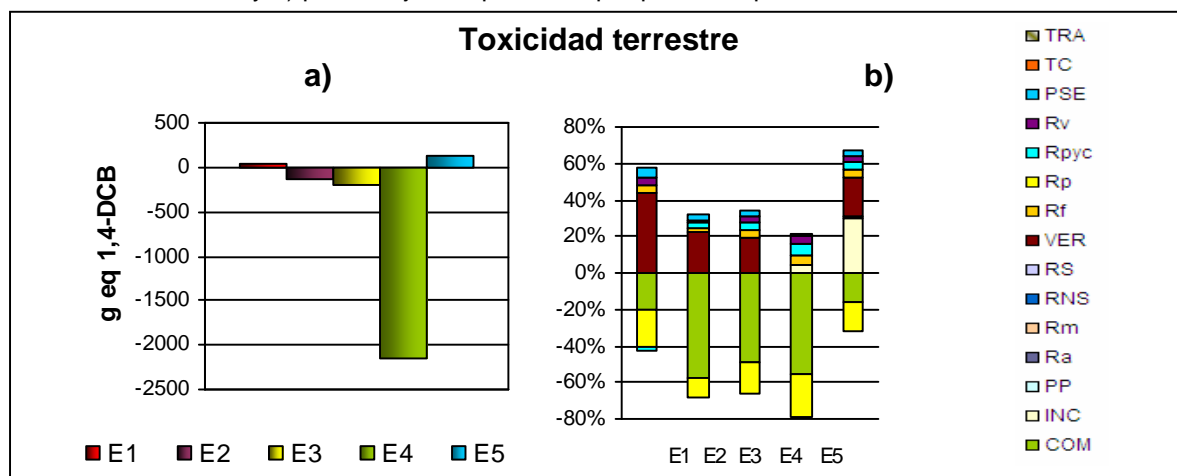


Figura 7. Contribuciones a la categoría de toxicidad terrestre, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.

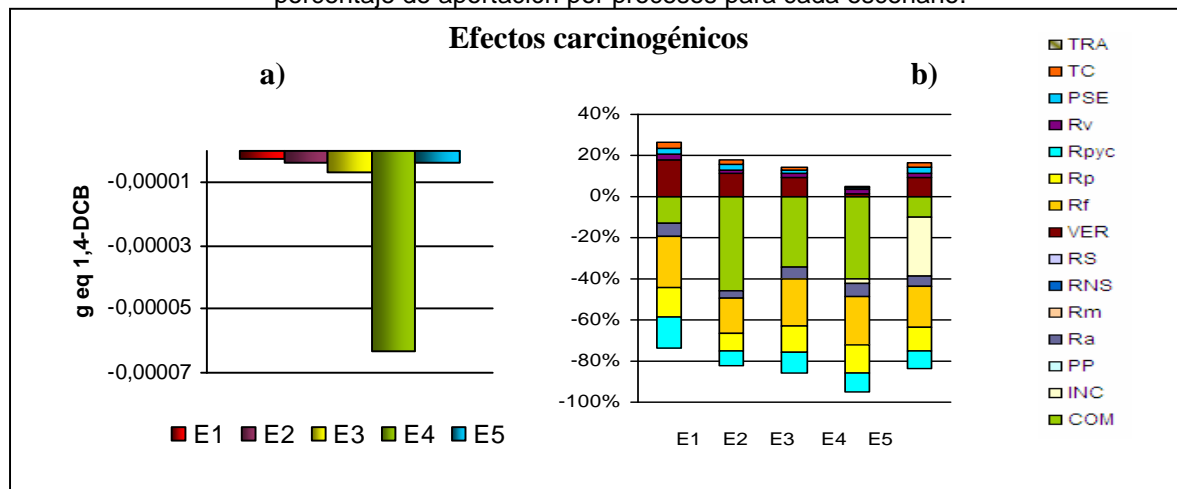


Figura 8. Contribuciones a la categoría de efectos carcinogénicos, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.

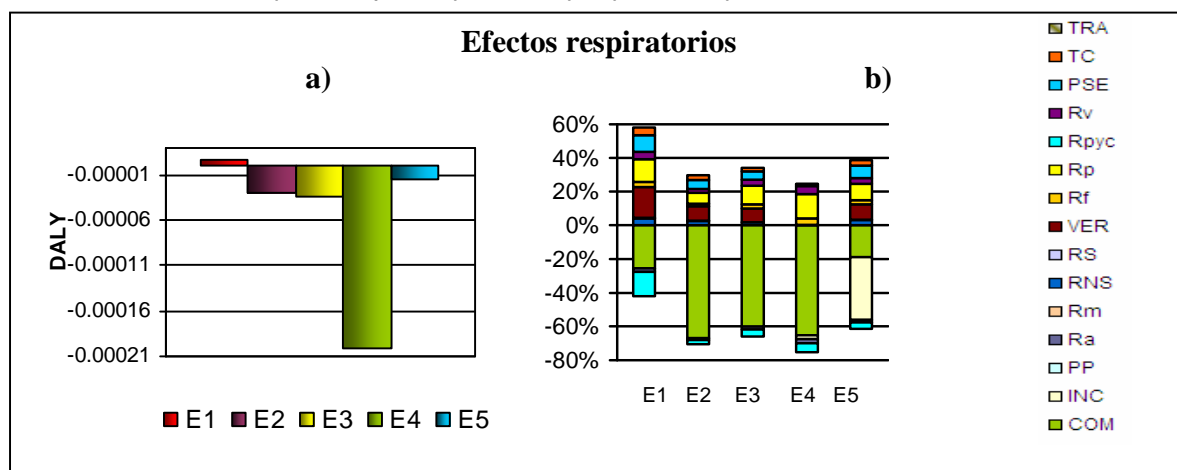


Figura 9. Contribuciones a la categoría de efectos respiratorios, a) valores totales por escenarios y b) porcentaje de aportación por procesos para cada escenario.

La Figura 8a muestra que todos los escenarios evitan los efectos carcinogénicos. La alternativa E4 es el escenario que evita más el impacto con  $-6.30 \times 10^{-5}$  gramos equivalentes de 1,4-DCB.

La Figura 8b muestra que VER es el principal generador de impacto por las descargas de dioxinas y metales en los lixiviados, lo cual coincide con lo reportado por Güereca *et al.*, [1]; aunque TC, Rv, PSE también contribuyen pero en menor medida. También se puede observar que los procesos de reciclaje (Rp, Rf, Rpyc) y COM e INC (E5) son los procesos ahorradores de impacto más importantes porque evitan las emisiones de metales pesados. El proceso de INC en el escenario E5 se presenta de forma relevante, superando la mitigación que hace el proceso de COM, esto se debe a que los beneficios por generar energía eléctrica.

La Figura 9a, el escenario E1 (el año base) es el único que presenta contribuciones a la categoría de efectos respiratorios con  $7.09E-06$  DALYs, el resto de los escenarios evitan el impacto, también se observa que E5 evita el daño en menor medida, con  $-1.54E-05$  DALYs, y E4 alcanza la mitigación máxima con  $-2.03E-04$  DALYs. La Figura 9b nos indica que VER, TC, Rp, Rf, Rv, RNS y PSE son los principales responsables de las contribuciones, y los procesos de INC, COM, Rpyc y Ra figuran como los procesos que evitan impactos en la categoría de efectos respiratorios.

## **4. Discusión**

### **4.1 Recogida de residuos**

Los procesos de recolección de residuos tanto de forma selectiva como no selectiva, no contribuyen de forma significativa en ninguna de las ocho categorías de impacto analizadas, esto se debe a que sus impactos no son relevantes al compararlo con el resto de procesos que incluyen uso de combustibles y energía eléctrica

### **4.2 Plantas de selección**

La planta de selección de residuos contribuye de manera poco significativa en todas las categorías de impacto analizadas debido a dos aspectos: 1) al uso de combustible para el funcionamiento de la pala mecánica que se encarga de mover los residuos que entran a las plantas de selección y 2) al consumo de energía eléctrica por las bandas transportadoras para la recuperación y clasificación de residuos. Los impactos no son relevantes al compararlos con el resto de procesos.

### **4.3 Proceso de fabricación de compost**

La fabricación de compost en todos los escenarios analizados, mitiga los impactos de forma significativa en las categorías de acidificación, eutrofización, toxicidad terrestre, efectos cancerígenos, efectos respiratorios y en extracción de combustibles fósiles. En las categorías de disminución del ozono estratosférico, efecto invernadero y formación de foto-oxidantes sólo el escenario E4 evita los impactos y esto se debe a que en éste sistema la proporción de fabricación de compost es relativamente mayor.

### **4.4 Proceso de reciclaje**

Los reciclajes de aluminio y papel y cartón, son los que representan una mitigación de impacto más significativa debido a éstos procesos representan importantes ahorros de energía y materiales en comparación con la producción a partir de materiales vírgenes.

El reciclaje de vidrio genera impactos en las ocho categorías analizadas de forma relevante; mientras que el reciclaje de aluminio, materiales férricos, plástico, vidrio y madera generan impactos de forma menos relevante.

### **4.5 Vertedero**

Los procesos de vertedero controlado y los tiraderos clandestinos contribuyen al impacto en todas las categorías analizadas debido principalmente a las emisiones de biogás y lixiviados,

aunque el vertedero controlado genera proporcionalmente menor impacto ya que cuenta con tecnología para la recuperación y tratamiento de biogás y lixiviados generados.

#### **4.6 Incineración**

El proceso de incineración con recuperación de energía mitiga los impactos de forma significativa en acidificación, formación de foto-oxidantes, efectos carcinogénicos y efectos respiratorios; lo cual se debe a que la electricidad generada en este proceso ayuda a mitigar dichos impactos.

### **5. Conclusiones**

El escenario E4 presenta el mejor comportamiento ambiental ya que disminuye los residuos depositados en el vertedero y se incluye el proceso de incineración con recuperación de energía, sin embargo este proceso no se realiza actualmente en México por lo que debe analizarse su viabilidad tanto técnica como económica.

Los escenarios E4 y E5 generan menos impactos que E1, E2 y E3. E1 genera mayor daño que E2 y E3 debido a que en éstos escenarios se incrementan los procesos de separación de residuos, de reciclaje y se disminuye el vertido controlado. De acuerdo a los resultados obtenidos se sugiere la siguiente jerarquía de tratamientos: fabricación de composta, incineración, reciclaje de materiales, vertedero controlado y tiraderos clandestinos.

### **Referencias**

- [1] Güereca, L., Gassó S., Baldasano J.M., Jiménez-Guerrero P. (2006). Life cycle assessment of two biowaste management systems for Barcelona, Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 49: 32-48.
- [2] Barlaz, M. A., Ranjithan, R. and Weitz K. A., (1995). Life cycle study of municipal solid waste management –System description. EPA Cooperative Agreement 832052. USA.
- [3] White, P.R., Franke, M. and Hindle, P., (1995). *Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory*. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- [4] Finnveden, G., Albertsson, A., Berendson, J., Eriksson, J., Höglund, L. O., Karlsson, S. and Sundqvist, J.O., (1995). Solid waste treatment within the framework of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3, No. 4, pp. 189-199.
- [5] Barton, J. R., Dalley, D. and Patel, V. S., (1996). Life cycle assessment for waste management. *Waste Management*, Vol. 16, Nos 1-3, pp. 35-50.
- [6] Finnveden G., (1999). Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. *Resources, Conservation and Recycling* 26:173-187.
- [7] Bjorklund, A., Dalemo, M. and Sonesson, U., 1999. Evaluating a municipal waste management plan using ORWARE. *Journal of Cleaner Production*. 7: 271-280.
- [8] Sonesson, U., Bjorklund, A., Carlsson, M. and Dalemo, M., 2000. Environmental and economic analysis of management system for biodegradable waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 28: 29-53.

- [9] Turkulainen, T. and Katajajuuri, J. 2000. Applying LCA to integrated resource and waste management –Substitution of primary energy resources. IEE Reports. VTT Chemical Technology, Espoo.
- [10] McDougall F., White P., Franke M., Hindle P., (2004). Gestión Integral de Residuos Sólidos, inventario de ciclo de vida, primera edición traducida. Procter & Gamble, Caracas. 624 pp.
- [11] Mendes, M.R., Aramaki, T. and Hanaki, K., (2003). Assessment of the environmental impact of management measures for biodegradable fraction of municipal soil waste in Sao Paulo City. Waste Management. 23: 403-409.
- [12] SMA. (2006). Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2006. Secretaria del Medio ambiente del Distrito Federal
- [13] PGIRS-DF. (2004). Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal 2004-2008, Secretaria del Medio Ambiente.
- [14] INEGI. (2005). Resultados definitivos del II Censo de Población y Vivienda 2005, para el Distrito Federal. Comunicado núm. 119/06.
- [15] DGSU. (2007). Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal 2007. Dirección de Servicios Urbanos del Distrito Federal.
- [16] GDF. (2007). El problema de la basura en el Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. Obtenido el 18 de Noviembre del 2007, desde <http://www.df.gob.mx/ciudad/residuos/residuos01>
- [17] Güereca, L. (2006). Desarrollo de una metodología para la valoración en Análisis de ciclo de vida aplicada ala Gestión integral de Residuos Municipales, tesis doctoral
- [18] Doménech, X., y Rieradevall, J., (2000). Balance ambiental de un depósito controlado de RSM. En: Agencia Metropolitana de Residuos. Segona jornada técnica sobre la gestión de residuos municipales –Els dipòsits controlats. España. pp. 75-90
- [19] Morris J., (2005). Comparative LCAs for curbside recycling versus either landfilling or incineration with energy recovery. International Journal of LCA 10 (4): 273-284.

## **Agradecimientos**

Se agradece al International Fellowships Program de la Fundación Ford por la beca otorgada para la realización de los estudios de Claudia Roxana Juárez López, al Departamento de Ingeniería de Proyectos de la Universidad Politécnica de Cataluña por las facilidades otorgadas para la realización de la estancia de investigación y al Gobierno de la Ciudad de México por la información proporcionada para la realización de éste trabajo.